含横向裂缝混凝土氯盐侵蚀所致锈裂面的细观分析

金浩[1],李政[2],余朔[3]

(1. 东南大学交通学院,211189 南京;2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,201804 上海;
3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,311122 杭州)

摘　要:为了更精确地分析氯盐侵蚀下含横向裂缝混凝土的锈胀开裂规律,考虑混凝土骨料的几何本征特性,利用激光扫描及图像处理技术获取混凝土的真实骨料库;在此基础上建立了扩散与应力耦合的三维细观锈胀开裂计算模型,分析了锈裂面的几何形态,并研究了锈裂面的宽度、角度与骨料体积率及骨料比表面积的关系。研究表明:在含横向裂缝的混凝土试块中,氯盐侵蚀所致的锈蚀开裂面均为“双月牙”形态,且开裂面形态随骨料比表面积增大呈现较强的不对称性;锈裂面的最大宽度随骨料体积率减小而增大,当骨料体积率增大到20%,开裂面最大宽度基本保持不变;锈裂面的最大夹角位于混凝土横向裂缝正下方,当骨料比表面积为0.160~0.197 m^2/kg时,锈裂面的最大夹角范围为144°~160°。

关键词:细观模型;钢筋锈蚀;开裂面形态;真实骨料;横向裂缝

中图分类号:TU43　　　　**文献标志码:**A

Meso-analysis of the rust cracked surface of concrete with transverse cracks caused by chloride salt erosion

JIN Hao[1], LI Zheng[2], YU Shuo[3]

(1. School of Transportation, Southeast University, 211189 Nanjing, China;
2. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, 201804 Shanghai, China;
3. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, 311122 Hangzhou, China)

Abstract: In order to more accurately analyze the rust expansion and cracking law of concrete with transverse cracks under chloride erosion, this paper considers the geometric intrinsic characteristics of concrete aggregates, uses laser scanning and image processing technology to obtain the real aggregate library of concrete; build on this basis A three-dimensional mesoscopic rust expansion and cracking calculation model coupled with diffusion and stress was developed. The geometry of the rust crack surface was analyzed, and the relationship between the width and angle of the rust crack surface and the volume rate of aggregate and the specific surface area of the aggregate was studied. The research shows that in the concrete specimens

收稿日期:2021-03-29　　　　**修回日期:**2022-01-15
基金项目:国家自然科学基金(No. 51908428);江苏省自然科学基金(No. BK20211173)
通信作者:金浩,博士,副研究员。E-mail:jinhao@seu.edu.cn
引用格式:金浩,李政,余朔. 含横向裂缝混凝土氯盐侵蚀所致锈裂面的细观分析[J]. 应用力学学报,2022,39(3):572-582.
JIN Hao, LI Zheng, YU Shuo. Meso-analysis of the rust cracked surface of concrete with transverse cracks caused by chloride salt erosion[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(3):572-582.

with transverse cracks, the corrosion cracked surfaces affected by chloride salt are all in the form of "double crescent", and the form of the cracked surfaces presents a strong asymmetry as the aggregate specific surface area increases. The maximum width of the rust cracked surface increases with the decrease of the aggregate volume rate. When the aggregate volume rate is increased to 20%, the maximum width of the cracked surface remains basically unchanged. The maximum included angle of the rust cracked surface is directly below the concrete transverse crack. When the aggregate specific surface area is 0.160-0.197 m^2/kg, the maximum included angle of the rust cracked surface ranges from 144° -160°.

Key words: mesoscopic model; steel corrosion; crack surface morphology; real aggregate; transverse crack

在工程中,管片是地铁盾构隧道的承重构件,且长期深埋于地下,受荷环境复杂,容易在荷载作用下出现不同程度的开裂[1]。外界的水和侵蚀物质便会沿裂缝渗透到钢筋表面,引发钢筋锈蚀。锈蚀不仅会降低混凝土与钢筋之间的黏结性能[2],还会因为锈胀压力而导致混凝土开裂[3-4],造成钢筋混凝土构件承载力降低,严重威胁地铁运营的安全。因此,有必要针对含横向裂缝的钢筋混凝土锈胀开裂规律进行研究。

实验[5]表明,在氯化物环境下,钢筋表面的锈层是不均匀的。为考虑到锈层在圆周方向上的不均匀分布,不少学者已经提出了采用不同类型的有限元模型来模拟单根或多根钢筋腐蚀引起的裂纹模式[6-7]。由这些研究可知,腐蚀引起的裂纹形态主要与不均匀腐蚀程度、钢筋直径有关。由于钢筋腐蚀程度的不均匀性,钢筋锈层厚度不仅沿圆周方向存在,而且沿纵向也存在[8]。为了分析钢筋混凝土在三维空间中的腐蚀引起的裂纹模式,Qiao 等[9]根据试验利用一组腐蚀分布数据,通过刚体弹簧法研究了混凝土表面沿纵向的锈胀开裂宽度。由于在实际工程中,混凝土结构如梁、管片等通常会受到竖向荷载的作用,并出现大小不一的横向裂缝[10],而目前的锈裂模型中并未考虑横向裂缝对锈胀产物的影响,大量 SEM 试验发现[11],在含横向裂缝的混凝土中,锈蚀产物的分布形态与不含横向裂缝的分布形态差异较大。

对于含有横向裂纹的混凝土,相关试验表明在含裂缝的钢筋混凝土中,发生钢筋锈蚀区域均集中在裂缝附近,且纵向锈蚀的宽度与裂缝宽度呈正比[12]。这是水分在裂缝中的传输速度远大于在未开裂混凝土中的传输速度导致的[13]。从而水分最先接触到裂缝处的钢筋,水中的氯离子使钢筋表面的钝化膜发生破坏[14]。在氧气充足的情况下,钢筋表面则容易发生宏观腐蚀[15]。由于在不同荷载下混凝土形成的裂缝形态及宽度均不同,对钢筋锈蚀的影响也会有差异。因此许多学者研究了混凝土开裂形态对钢筋锈蚀的影响。Otsuki 等[16]研究了不同裂缝宽度的混凝土中钢筋的锈蚀速率,得出开裂混凝土钢筋的锈蚀速率是未开裂的 3 ~5 倍的结论。Xu 等[17]结合数值及试验,分析了裂缝宽度为 0.2 ~0.5 mm 时钢筋的阳极的占比率,计算了不同裂缝宽度下钢筋腐蚀电位及锈蚀率的分布特征。Yu 等[18]建立了含横向裂纹的钢筋混凝土三维扩散力学模型,采用扩展有限元法(XFEM)模拟了腐蚀引起的裂纹,发现横向裂纹的偏转角不仅影响腐蚀裂纹的宽度和长度,而且决定了腐蚀裂纹的位置。Zhou 等[19]提出一种混凝土修补系统的细观中尺度建模方法,用来研究界面粗糙度和黏结强度等因素引起的收缩裂纹扩展机理。

以上研究主要分析了混凝土裂缝宽度和偏转角度对钢筋锈蚀率及腐蚀电位的影响规律,但忽略了混凝土细观几何特征对开裂面的影响,且研究方法多为试验法,数值方法并未考虑真实骨料。因此,为了更精确地分析氯盐侵蚀下含横向裂缝混凝土的锈胀开裂规律,本研究考虑混凝土真实骨料的几何本征特性,建立了扩散与应力耦合的三维细观锈胀开裂计算模型,以期为管片锈胀开裂机理及盾构隧道安全评估等研究提供依据。

1 混凝土三维真实骨料建模

1.1 骨料的形成

对于真实骨料而言[20],单个骨料的轮廓形状复杂且呈凹凸状,以往采用特定算法构建的多边形或多面体外轮廓与真实骨料出入较大。为此,本研究采用 Creaform 公司的手持式激光扫描仪(SCAN 50TM)对真实碎石骨料样本进行了测试。在测试中,选取骨料的粒径范围为 2.36 ~25 mm,共选取了

100 个骨料进行测试,扫描得到的三维骨料轮廓三角面片及点云,在 VXelements 数据采集软件平台中将这些骨料导出为 obj 格式,并导入 matlab 中进行处理形成骨料库。

1.2 骨料的投放

骨料投放要求相邻骨料之间不能重叠,同时骨料含量能达到预期的目标值,而投放于指定区域的骨料数量较多,为保证骨料能够快速、准确的投放,建立适用于骨料高效率投放的算法尤为重要。为此,众多学者提出了不同的投放算法,如逐个投放法、基骨料一次投放法、被占区域剔除法、分层摆放法、背景网格法等。其中,逐个投放法因其算法简单,且适用于不同形状的骨料而被广泛使用,本研究也将使用该方法。在投放骨料的算法设计中考虑了骨料级配,具体级配曲线如图 1 所示。

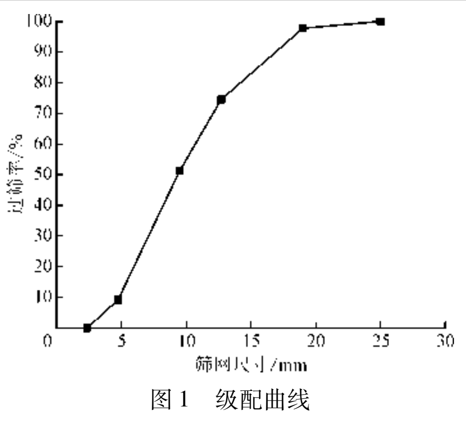


图 1 级配曲线

Fig. 1 Grading curve

在骨料侵入判断准则方面,为避免骨料之间交叉重叠,量取真实骨料 x,y,z 三个方向的最长值,建立基于真实骨料的外接立方体,以立方体不重叠为判定依据,进行真实骨料随机投放,不同骨料体积率投放如图 2 所示。

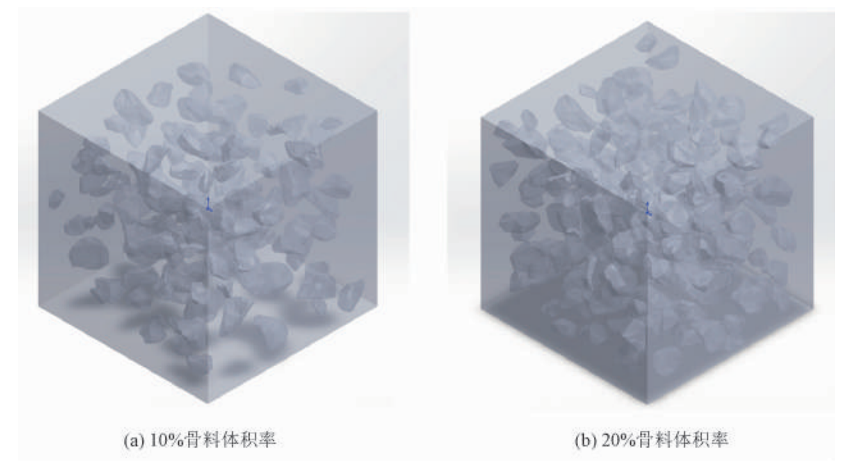


图 2 不同骨料体积率混凝土试块

Fig. 2 Concrete test block with different aggregate volume ratio

2 扩散与应力耦合的三维细观锈裂计算模型

2.1 氯离子扩散计算

研究表明,当钢筋表面的氯离子含量超过临界值时,钝化层将被破坏,钢筋表面会发生电化学腐蚀反应[21]。依据 Angst 等[21]的研究,临界值可设定为水泥重量的 0.4%。氯离子在混凝土中扩散,可用 Fick 的动力学第二定律[22]进行数学描述,即

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\nabla(D_{\mathrm{cl},i}\nabla C_i) \tag{1}$$

式中 C 表示氯化物浓度。式(1)表示在特定位置(x,y,z)处,氯化物浓度 C 随时间 t 的变化。假设钢筋纵向为 x 方向,以 x 方向为例分析溶液,边界和初始条件可以表示为

$$C(x,t)=C_0+(C_S-C_0)\cdot\left[1-\mathrm{Erf}\frac{x}{2\sqrt{D_{\mathrm{cl}}\cdot t}}\right] \tag{2}$$

$$\begin{cases}C(x,0)=C_0 & \text{(initial condition)}\\ C(0,t)=C_S,\ C(\infty,t)=0 & \text{(boundary condition)}\end{cases} \tag{3}$$

式中:C_0和 C_S 分别为混凝土中的初始氯化物含量以及混凝土表层表面氯化物的含量,在研究中,将 C_0 设为 0%,水泥的 C_S 取为 2%[23];Erf(·)表示高斯误差函数;D_{cl}表示氯离子的扩散系数。实际上,氯离子在混凝土中的扩散系数不是恒定的,该值主要受湿度、氯离子在混凝土中结合强度和混凝土裂缝尺

寸的影响。扩散系数方程可表示为

$$D_{cl}=\begin{cases}D_{cl}^{Sound}=D_0\cdot f(RH)\cdot f(C_B)\\D_{cl}^{Cr}=D_{cl}^{Sound}\cdot f(w_{eff})\end{cases}\tag{4}$$

式中：D_0为参考氯化物扩散系数，它仅与混凝土的水灰比有关，在研究中 D_0取 6×10^{12} m^2/s[23]；$f(RH)$和$f(C)$分别代表湿度影响因子和氯离子在混凝土中结合强度影响因子[24-25]。

$$f(RH)=\left[1+\frac{(1-RH)^4}{(1-RH_c)^4}\right]^{-1}\tag{5}$$

$$f(C_B)=\frac{1}{1+\dfrac{\alpha}{\omega_e(1+\beta C_F)^2}}\tag{6}$$

式中：RH 为相对湿度，RH_c 为临界湿度（RH_c = 75%）；α 和 β 为结合常数；C_F为游离氯离子含量；ω_e为蒸发水含量；C_B为结合氯含量。混凝土中总含量C_T结合游离氯离子的浓度与以下因素有关：$C_T=C_B+\omega_e C_F$。在研究中，RH 的值选为 70%[26]，α 和 β 分别取 11.8 和 4.0[27]，ω_e 取 0.6[22]。

为了研究垂直横向裂缝宽度与氯离子扩散之间的关系，已有学者进行了许多室内实验[28-29]，并根据裂缝宽度的限制范围给出了不同的经验公式。根据 Park 等[29]的实验结果，裂纹对氯离子扩散的影响可以表示为

$$f(w)=1+347.85w-1\,642.57w^2+4\,189w^3,\quad(0.1\ \text{mm}\leqslant w\leqslant0.4\ \text{mm})$$

2.2 锈层厚度的计算

根据 Butler-Volmer 定律，钢筋表面阳极和阴极的电极反应式为

$$i_{Fe}=i_{Fe}^0e^{2.3(\Phi-\Phi_{Fe}^0)/\beta_{Fe}}\tag{7}$$

$$i_{O_2}=i_{O_2}^0\frac{C_o}{C_{ob}}e^{2.3(\Phi_{O_2}^0-\Phi)/\beta_{O_2}}\tag{8}$$

式中：C_{ob}为管片混凝土表面的氧气含量；C_o 为钢筋与混凝土交界处的氧气含量；Φ 为钢筋表面的腐蚀电位；i_{Fe}^0和 $i_{O_2}^0$ 分别为阳极和阴极的交换电流密度；Φ_{Fe}^0和 $\Phi_{O_2}^0$分别为钢筋还原反应及氧化反应的平衡电位；β_{Fe} 和 β_{O_2} 分别为阳极和阴极的塔菲尔斜率。管片混凝土的电阻率取 140 Ω · m[30]，其余参数取值如表 1 所示[31]。

对于锈层的计算，根据 Faraday 定律，沿钢筋环向半径的减小值 $r_1(\theta,t)$ 可写为[32]

$$r_1(\theta,t)=\frac{\int_{t_1}^{t}i_{Fe}(\theta,t)\,dt\cdot A_{Fe}}{z_{Fe}\cdot F\cdot\rho_s}\tag{9}$$

式中：θ 为沿钢筋周向的角度，取 0° ~ 360°；i_{Fe} 为阳极腐蚀电流密度，计算时选取锈蚀时间内的平均值，t_1 为腐蚀开始时间；A_{Fe} 为铁原子量，取 55.85 g/mol；z_{Fe}为阳极反应化合价，取 2；ρ_s 为钢筋密度；F 为法拉第常数。

表 1 电化学腐蚀相关参数

Tab. 1 Related parameters of electrochemical corrosion

参数	单位	Fe	O_2
平衡电位	V	−0.76	0.189
交换电流密度	A/m^2	7.1×10^{-5}	7.7×10^{-7}
塔菲尔斜率	V/dec	0.41	−0.18

不同腐蚀产物的体积膨胀率有差异，假定生成的腐蚀产物均为Fe_2O_3，体积膨胀率 δ 取值 2.2[33]。

忽略掉腐蚀产物和钢筋之间的压缩变形，腐蚀层厚度 $r_2(\theta,t)$ 可写为

$$r_2(\theta,t)=\delta\cdot r_1(\theta,t)\tag{10}$$

则锈蚀产物相对原钢筋的锈层厚度表示为

$$u_r(\theta,t)=r_2(\theta,t)-r_1(\theta,t)=(\delta-1)r_1\tag{11}$$

3 含横裂缝混凝土细观模型

3.1 模型尺寸

本研究中模型尺寸参考 YU 等[18]建立的含向横裂缝混凝土的扩展有限元几何模型，混凝土的尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm，钢筋直径为 16 cm，预设裂缝宽度为 0.4 mm，裂纹垂直深度为 33.5 mm，具体尺寸如图 3 所示。

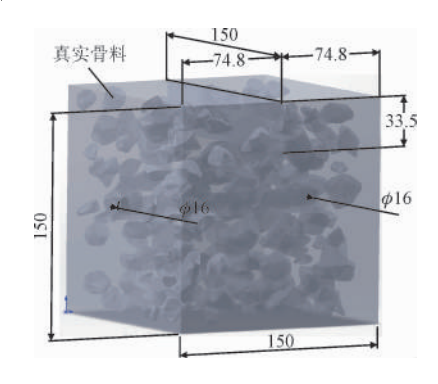


图 3 几何尺寸图（单位：mm）

Fig. 3 Geometry drawing (unit: mm)

3.2 混凝土损伤本构

在数值计算中，材料的开裂行为采用 Petersson[34]提出的双线性软化曲线，裂缝面上传递

的拉应力大小决定于它的张开度 ω，即 $\sigma=\sigma(\omega)$，并通过控制材料的断裂能以保证裂缝开展时所需的能量是唯一的，如图 4 所示。只需抗拉强度 f_t 和断裂能 G_f 两个参数即可确定材料的软化关系，对于参数取值，Petersson 建议采用 $\sigma_s=f_t/3$，$\omega_s=0.8G_f/f_t$，$\omega_0=3.6G_f/f_t$。

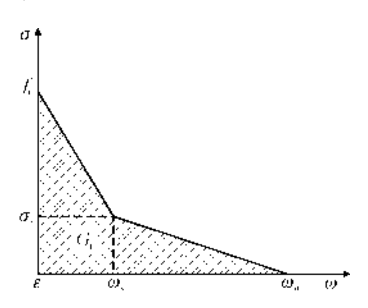


图 4　黏聚力-裂缝张开位移曲线

Fig. 4　Cohesion-crack opening displacement curve

材料的压缩行为采用双折线损伤变量演化模型，如图 5 所示。f_c 为抗压强度；f_{cr} 为残余抗压强度；ε_0 为对应 f_c 的主压应变；ε_r 为对应与抗压残余强度 f_{cr} 的残余应变；ε_u 为极限压应变。

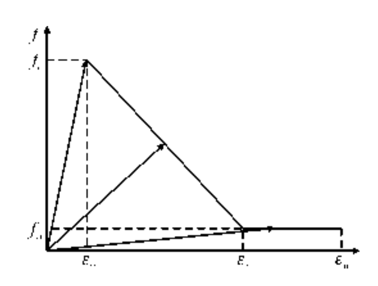


图 5　双折线损伤本构关系

Fig. 5　Double fold line damage constitutive relation

损伤变量可表示为

$$D=\begin{cases}0, & \varepsilon_{max}<\varepsilon_0\\ 1-\dfrac{\eta-\lambda}{\eta-1}\dfrac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{max}}+\dfrac{1-\lambda}{\eta-1}, & \varepsilon_0<\varepsilon_{max}\leqslant\varepsilon_r\\ 1-\lambda\dfrac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{max}}, & \varepsilon_r<\varepsilon_{max}\leqslant\varepsilon_u\\ 1, & \varepsilon_{max}>\varepsilon_u\end{cases}\tag{12}$$

式中：ε_{max} 为加载史上最大主压应变值。各参数关系为 $f_{tr}=\lambda f_r(0<\lambda<1)$，$\varepsilon_r=\varepsilon_0$，$\varepsilon_u=\xi\varepsilon_0(\xi>\eta)$。本次计算中 $\lambda=0.1$，$\eta=10$，骨料、砂浆和界面的 ξ 分别取 5、4 和 4。根据文献[35-38]，对材料参数的取值，并通过数值试验进行参数反演，得到的各相材料力学参数取值见表 2。

表 2　各相材料力学参数

Tab. 2　Material mechanical parameters of each phase

材料类型	弹性模量/GPa	抗拉/抗压强度/MPa	断裂能/($N\cdot m^{-1}$)	泊松比
骨料	80	6/80	120	0.16
砂浆	26	3/32	65	0.22
界面	25	2/30	50	0.22
混凝土	32	2.4/26	100	0.20

3.3　锈胀压力

锈胀位移的变化关系如图 6 所示。膨胀应力可以用式(13)表示。现有研究[35]表明腐蚀产物的弹性模量(E_{corr})在 0.1 ~ 0.5 GPa 范围内，Tran 等[39]采用 0.5 GPa 的弹性模量模拟腐蚀开裂并通过试验验证，模型中的弹性腐蚀产物的模量也设定为 0.5 GPa。

$$\sigma=E_{corr}(\Delta\varepsilon-\Delta\varepsilon_0)=E_{corr}\cdot\frac{\Delta D_1-\Delta D_f}{D_r}\tag{13}$$

式中：ΔD_f 是每个分析步骤中自由扩展的增量；ΔD_1 是每个分析步骤中实际展开 D_1 的增量。

$$D_f(\theta,t)=(\lambda-1)\cdot D_2=(\lambda-1)\cdot S_{corr}(\theta,t)\tag{14}$$

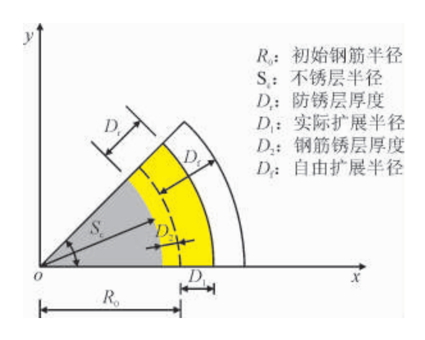


图 6　锈胀位移关系

Fig. 6　Corrosion expansion displacement relationship

由于锈胀系数主要受湿度、氧气和氯离子的影响，Zhao 等[40]指出开裂前混凝土结构中钢筋的氧气补充较低，在模型中取锈膨胀系数 λ 为 2.9。因此，自由扩散范围 D_f 可以通过式(14)计算。

图 7 为模型整体的计算流程图，其锈蚀的触发条件为钢筋表面的氯离子含量大于 0.4%，通过迭代计算不同阶段的锈层形态，并基于式（13）计算锈胀压力，实现氯离子扩散与锈胀压力的耦合计算，当锈胀压力大于混凝土抗拉强度时，混凝土发生开裂。

开始
设置初始条件和边界条件 $C(x,0)=C_0$ $C(0,t)=C_s$
扩散计算
氯离子扩散 $\frac{\partial C}{\partial t}=\nabla(D_{cl}\nabla D_l)$
NO
$C_{cl}>0.4\%$?
YES
计算锈蚀区域α
锈蚀计算
电化学锈蚀计算分析
电势分布 $\nabla\left(\frac{1}{\rho}\nabla E\right)=0$ $i_{mac}=\frac{1}{\rho}\nabla E$
氧气浓度 $\nabla\cdot(D_{O_2}\nabla C_{O_2})=0$ $\frac{i_{o_2}}{m\cdot F}=D_{O_2}\cdot\nabla C_{O_2}$
计算锈层厚度
$S_{corr}(\theta,t)=\frac{\int_{t_0}^{t} i_{mac}(\theta,t)\mathrm{d}t\cdot M_{Fe}}{\rho_s\cdot F\cdot n_s}$
开裂计算
计算锈胀应力
$D_r(\theta,t)=(\lambda-1)\cdot S_{corr}(\theta,t)$
$\sigma=E_{corr}(\Delta\varepsilon-\Delta\varepsilon_0)=E_{corr}\cdot\frac{\Delta D_r-D_r}{D_r}$
$f=\frac{\sigma_{max}}{\sigma^0_{max}}>1$?
NO
YES
模拟锈胀裂缝
结束

图 7　计算流程图

Fig. 7　Calculation flow chart

4　三维细观锈裂面形态分析

由 Otsuki 等[16]的研究，有无横向裂缝对混凝土内钢筋的锈蚀速率影响较大。为分析不同锈蚀年限下混凝土内部开裂面形态变化规律，控制横向裂缝深度初始值一定，模型激励为不同锈蚀时间的钢筋锈胀力，计算工况由表 3 所示。

表 3　锈蚀年限计算工况

Tab. 3　Corrosion years calculation conditions

骨料体积率/%	钢筋直径/cm	比表面积/($m^2\cdot kg^{-1}$)	锈蚀时间/年
20	16	0.16	2
			4
			6
			8

图 8 为锈蚀 8 年时，不同截面处沿圆周方向的锈层分布形态，其中截面 A 为裂缝正中心，截面 B 和 B'分别位于为距截面 5 mm 的两侧，截面 C 和 C'分别位于距截面 10 mm 的两侧。由此可知，位于裂缝正下方的锈层厚度最大，距中心越远，锈层厚度越小，且两边的锈层呈对称分布。

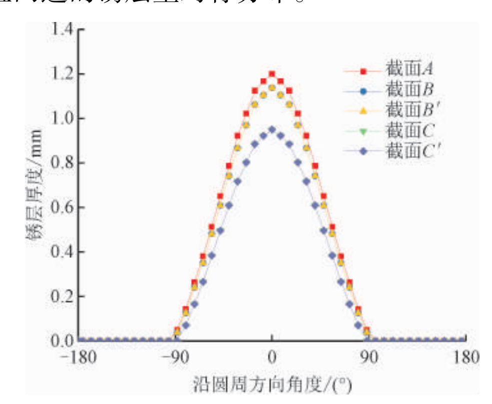


图 8　不同截面处沿圆周方向的锈层分布形态

Fig. 8　Distribution morphology of rust layer along the circumference at different sections

由于混凝土的抗拉极限强度远小于抗压极限强度，故在钢筋锈胀力作用下优先分析其拉伸破坏情况，计算结果如图 9 所示，图中蓝色的区域指开裂面。

由图 9 可知，在不同锈蚀年限下，氯盐侵蚀所致的锈蚀开裂面均为“双月牙”形态，与文献[18]的实验验证结果一致。且在预设裂缝的正下方开裂面夹角达到最大值、开裂面宽度达到最大值，开裂面最大

宽度随着锈蚀年限的增加而增大。且随着锈蚀年限的增大,开裂面的不对称性越明显,这是因为骨料影响开裂面的延展方向。由于混凝土试块内骨料分布是随机的,故随着裂缝面逐渐向四周延展,其侵入的骨料范围越大,骨料的随机分布特性对裂缝面延展形态影响越大,整体来看开裂面形态趋向不规则发展。

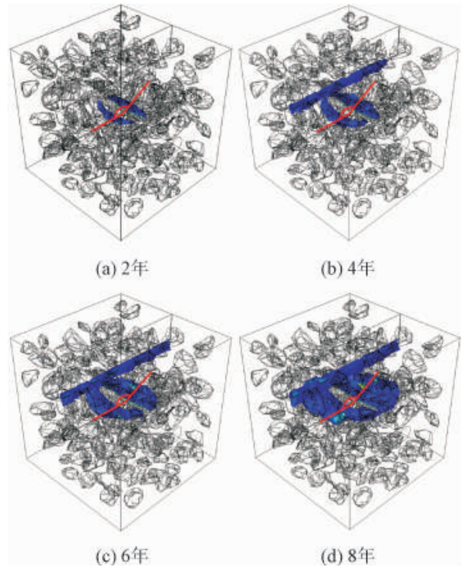


图 9　拉伸破坏损伤因子云图

Fig. 9　Damage factor of tensile failure

进一步分析混凝土试块内部开裂面延展情况,截取开裂面最大宽度处的截面,如图 10 所示。可以看到随着锈裂年限的增长,混凝土内部受拉损伤是沿着骨料间隙扩展的,整体形态呈"八"字型,开口朝向预设裂缝侧。

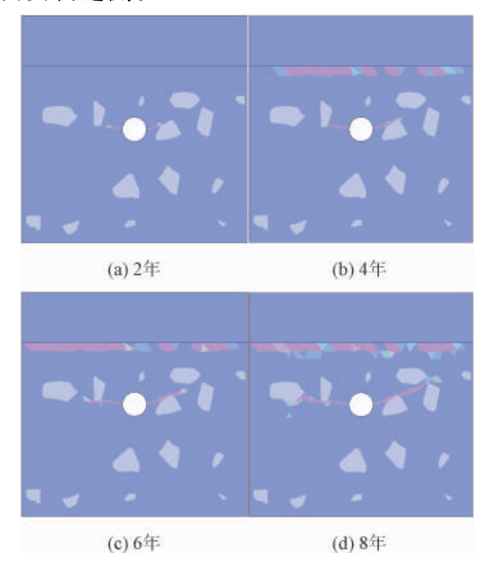


图 10　预设裂缝正下方拉伸损伤图

Fig. 10　Tensile damage map directly below the preset crack

对图 10 中开裂面最大宽度、近似夹角进行统计,如表 4 所示。由表 4 可知,锈蚀年限从 2 年发展到 8 年,裂缝宽度同比增大到 4.0 cm、5.5 cm、7.1 cm、10.5 cm,每两年增加的比率分别为 38%、29%、48%。从第 6 年开始,混凝土开裂面宽度增大的速率加快,这是由于混凝土内部开裂面已经有较大范围,混凝土内部黏结强度降低区域较多,进而开裂速率加快。

由图 11 可知:开裂面最大宽度受锈蚀年限影响较大,变化趋势为非线性,锈蚀 8 年后的开裂面最大宽度比锈蚀 2 年时的增加 163%;而开裂面夹角变化不明显,这是由于裂缝沿着骨料间隙延展,骨料分布未改变,裂缝夹角变化不大。

表 4　开裂面特征参数统计表

Tab. 4　Feature parameter statistics of cracking surface

锈蚀年限	2 年	4 年	6 年	8 年
开裂面最大宽度/cm	4.0	5.5	7.1	10.5
开裂面夹角/(°)	157	159	163	161

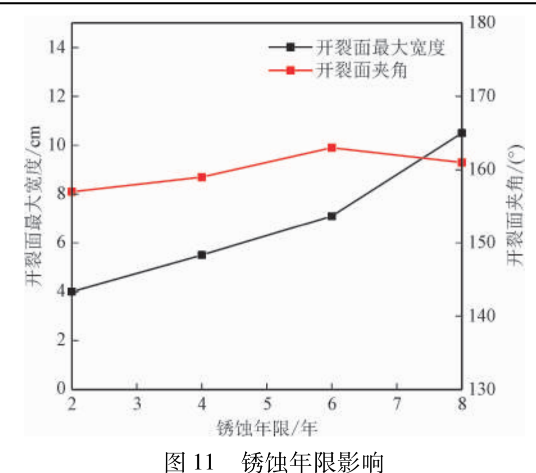


图 11　锈蚀年限影响

Fig. 11　Influence of corrosion age

5　锈裂面影响因素参数化分析

为进一步分析混凝土开裂面形态的影响因素,分析不同骨料体积率、不同骨料比表面积下混凝土开裂面形态。

5.1　锈裂面形态分析

骨料比表面积(specific surface area)是指单位质量固体物质的总表面积。比表面积是骨料颗粒几何特性之一,物质的分散程度愈高或内部孔隙愈多,比表面就愈大。在本次计算中,设定体积率为 20% 定值,锈蚀年限为 6 年,钢筋直径为 16 cm,取不同粒径含量的骨料,获得在同一体积率下的不同比表面

积的试样。骨料的密度为 2.7 g/cm^3,比表面积计算工况如表 5 所示。

统计不同工况下计算结果,如图 12 所示,将开裂面最大宽度出现的位置用红色实线标出。

表 5 计算工况数据表

Tab. 5 Calculation data sheet

工况	不同粒径骨料占比/%		颗粒数	总表面积/mm^2	总质量/g	比表面积/(m^2 · kg^{-1})
	15 ~ 25 mm	25 ~ 35 mm				
1	20	80	181	157 461	987	0.160
2	35	65	229	171 337	982	0.174
3	50	50	264	176 464	943	0.187
4	65	35	316	196 287	995	0.197

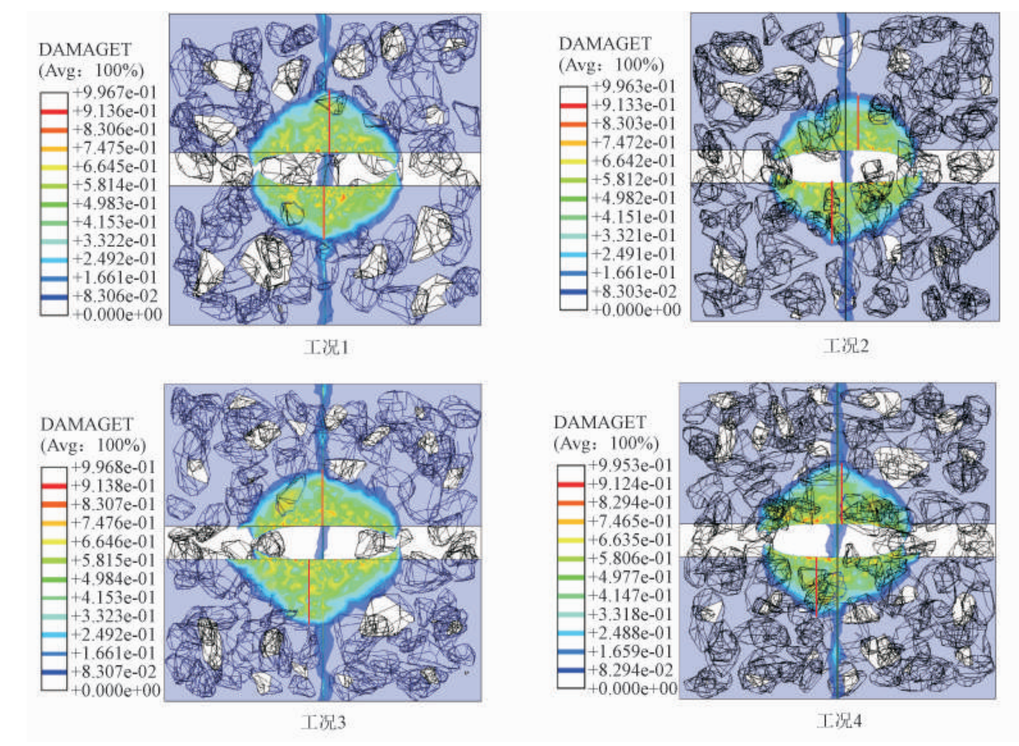


图 12 不同比表面积开裂面示意图

Fig. 12 Cracking surface with different specific surface area

统计各工况下开裂面最大宽度如表 6 所示。

表 6 计算结果统计表

Tab. 6 Calculation result statistics table

工况	比表面积/(m^2 · kg^{-1})	开裂面最大宽度/cm
1	0.160	7.1
2	0.174	7.2
3	0.187	7.4
4	0.197	7.5

如图 12 所示,在 4 种工况下,锈裂面面积的比值为 0.7:0.85:0.9:1,说明比表面积越大,锈裂面的面积越大。随着骨料比表面积增大,混凝土开裂面最大宽度呈递增趋势,整体来看变化不大,如表 6 所示。这是由于当骨料体积率一定时,骨料比表面积增大,骨料颗粒数增加,其平均粒径相对减小。当小粒径(15 ~ 25 mm)骨料含量增加时,更易在混凝土内部产生应力集中现象,导致开裂面最大宽度范围呈上升趋势;而整体趋势较为稳定是因为开裂面最大宽度受锈蚀年限影响较大,本次计算工况中锈蚀年限为 6 年保持不变,故最终开裂面最大宽度基本维持稳定。

此外,分析图 12 开裂面最大宽度出现的位置,发现其有较大的不对称性,这是因骨料分布的随机性导致的。骨料比表面积增大,导致混凝土锈裂面的延展路径增加,从而钢筋两侧的开裂面有较强的不对称性。

统计不同比表面积下开裂面的最大宽度、骨料颗粒数,如图 13 所示。

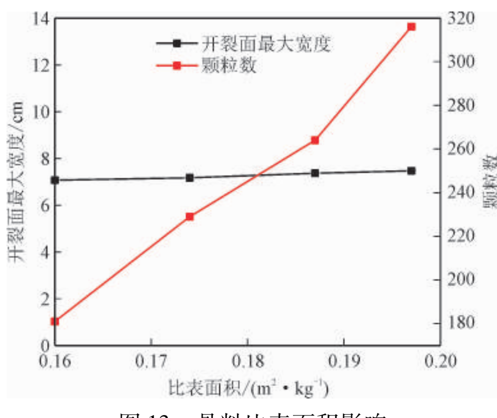


图 13　骨料比表面积影响

Fig. 13　Influence of aggregate specific surface area

由图 13 可知，骨料颗粒数和骨料比表面积基本呈线性正相关关系，而开裂面最大宽度由于受锈蚀年限影响较大，在锈蚀年限一定时（6 年），总体值保持稳定。

5.2　骨料体积率对锈裂面宽度的影响

取骨料体积分别为 10%、15%、20%、25%，计算工况如表 7 所示。

表 7　骨料体积率计算工况表

Tab. 7　Calculation condition of aggregate volume rate

骨料体积率/%	钢筋直径/cm	比表面积/($m^2 \cdot kg^{-1}$)	锈蚀时间/年
10	16	0.16	6
15	16	0.16	6
20	16	0.16	6
25	16	0.16	6

图 14 为不同工况下的开裂面形态云图。

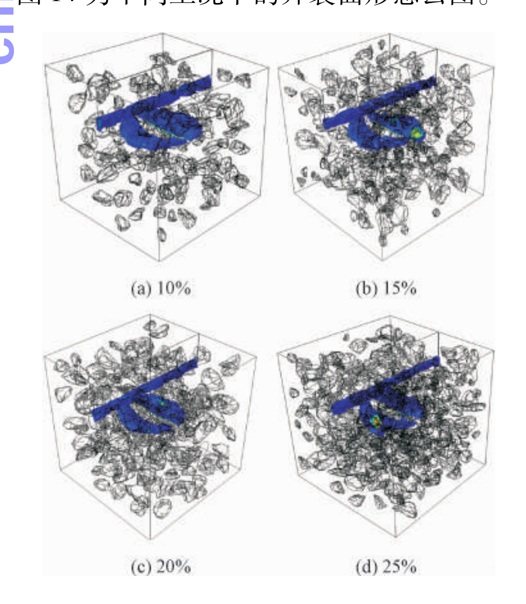


图 14　锈裂面云图

Fig. 14　Rust cracked surface cloud map

统计开裂后裂缝宽度如表 8 所示。

表 8　最大开裂面宽度统计表

Tab. 8　Maximum cracking surface width statistics

骨料体积率/%	10	15	20	25
开裂面最大宽度/cm	8.6	7.4	7.1	7.0

由表 8 可知，随着骨料体积率的增加，开裂面最大宽度有减少的趋势。骨料体积率由 10% 增加到 15% 后，开裂面最大宽度由 8.6 cm 减少至 7.4 cm，减少了 14%。这是由于体积率增大，骨料颗粒数增加，开裂面延展时经过的相对路径增加，假设不同骨料体积率在一定的锈蚀年限下钢筋的锈胀力是不变的，故最终导致裂缝延展的范围减小。而后当骨料体积率达到一定值时（20%），开裂面最大宽度基本不再发生变化。骨料体积率由 20% 增加到 25% 后，开裂面最大宽度由 7.1 cm 减少至 7.0 cm，仅减少了 1.4%。这说明增大骨料体积率可抑制钢筋锈蚀后混凝土的开裂情况，但是这种抑制作用是有限的，这是因为当混凝土试块体积一定时，其所能容纳的骨料体积率存在一个上限，而当骨料体积率越接近这个上限时，开裂面延展时经过的相对路径不再增加，从而导致最终开裂面最大宽度维持稳定。

如图 15 所示，当骨料体积率超过 20% 后，开裂面最大宽度曲线下降趋向平缓。

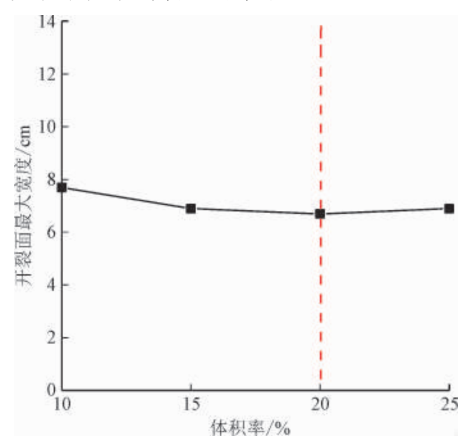


图 15　锈裂面宽度-骨料体积率图

Fig. 15　Rust crack surface width-aggregate volume rate

5.3　骨料比表面积对锈裂面夹角的影响

设骨料体积率为 20% 定值，锈蚀年限为 6 年，钢筋直径为 16 cm，取不同粒径含量的骨料，获得在同一体积率下的不同比表面积的试样。统计比表面积分别为 0.160 m^2/kg、0.174 m^2/kg、0.187 m^2/kg、0.197 m^2/kg下锈裂面的最大夹角如图 16 所示。

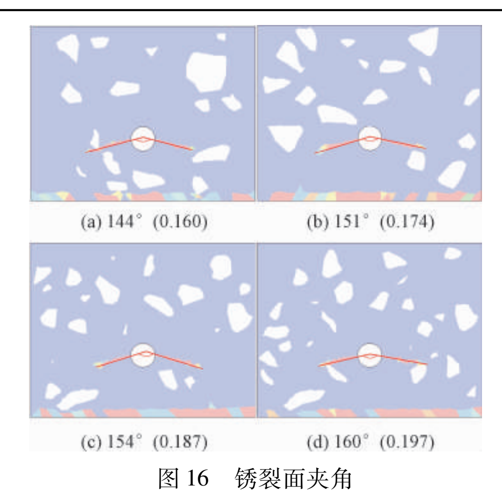


图 16　锈裂面夹角

Fig. 16　Angle of rust cracked surface

如图 16 所示,随着骨料比表面积从 0. 160 m^2/kg 增大到0. 197 m^2/kg时,混凝土试块内部骨料趋于细颗粒化,同一截面位置下骨料数目增多,开裂面最大夹角变化范围在 144° ~160°之间,且最大夹角出现的截面位置均在预设裂缝的正下方。由此可知,随着骨料比表面积的增大,开裂面的夹角整体呈增大趋势,且比表面的增大不会改变最大夹角出现的截面位置。

6 结　论

本文建立了扩散与应力耦合的三维细观锈胀开裂计算模型,分析了锈裂面的几何形态,并研究了锈裂面的宽度、角度与骨料体积率及骨料比表面积的关系。结论如下。

1)不同锈蚀年限下,氯盐侵蚀所致的锈蚀开裂面均为“双月牙”形态,在预设裂缝的正下方开裂面夹角达到最大值,开裂面宽度达到最大值,开裂面最大宽度随着锈蚀年限的增加而增大。且开裂面形态随骨料比表面积增大呈现较强的不对称性。

2)随着骨料体积率的增大,开裂面最大宽度呈减少的趋势,而当骨料体积率增大到一定值时(20%),开裂面最大宽度基本保持不变。

3)随着骨料比表面积增大,混凝土开裂面最大宽度呈递增趋势,且锈裂面的最大夹角位于混凝土横向裂缝正下方,当骨料比表面积为 0. 160 m^2/kg ~0. 197 m^2/kg 时,锈裂面的最大夹角范围为144° ~160°。

参考文献

[1] 苏昂,王士民,何川,等. 复合地层盾构隧道管片施工病害特征及成因分析[J]. 岩土工程学报,2019,41(4):683-692.
SU Ang, WANG Shimin, HE Chuan, et al. Disease characteristics and causes analysis of segments of shield tunnels in composite stratum during construction[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2019,41(4):683-692(in Chinese).

[2] YALCINER H,EREN O,SENSOY S. An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover strength and corrosion level[J]. Cement and concrete research,2012,42(5):643-655.

[3] THYBO A,MICHEL A,STANG H. Smeared crack modelling approach for corrosion-induced concrete damage[J]. Materials & structures,2017,50(2):132-146.

[4] 马亚飞,王磊,张建仁. 锈胀钢筋混凝土拱肋承载力试验与模拟[J]. 工程力学,2017,34(3):155-161.
MA Yafei,WANG Lei,ZHANG Jianren. Experimental and numerical studies on reinforced concrete arch ribs with corrosion-induced cracks[J]. Engineering mechanics,2017,34(3):155-161(in Chinese).

[5] ZHANG W, FRANÇOIS R, CAI Y, et al. Influence of artificial cracks and interfacial defects on the corrosion behavior of steel in concrete during corrosion initiation under a chloride environment [J]. Construction and building materials,2020,253:119165.

[6] ZHANG Y,SU R K L. Corner cracking model for non-uniform corrosion-caused deterioration of concrete covers[J]. Construction and building materials,2020,234:117410.

[7] XI X, YANG S, LI C. A non-uniform corrosion model and meso-scale fracture modelling of concrete[J]. Cement and concrete composites,2018,108:87-102.

[8] XI X,YANG S. Investigating the spatial development of corrosion of corner-located steel bar in concrete by X-ray computed tomography [J]. Construction and building materials,2019,221:177-189.

[9] QIAO D,NAKAMURA H,YAMAMOTO Y,et al. Crack patterns of concrete with a single rebar subjected to non-uniform and localized corrosion [J]. Construction and building materials, 2016, 116: 366-377.

[10] RASHID K,LI X,XIE Y,et al. Cracking behavior of geopolymer concrete beams reinforced with steel and fiber reinforced polymer bars under flexural load[J]. Composites (Part B),2020,186:107-127.

[11] XI X,YANG S. Investigating the spatial development of corrosion of corner-located steel bar in concrete by X-ray computed tomography [J]. Construction and building materials,2019,221:177-189.

[12] WEI W,WEI L,SHU G. The effect of crack width on chloride-induced corrosion of steel in concrete[J]. Advances in materials science and engineering,2017,2017:1-11.

[13] ZHANG P,LIU Z,HAN S,et al. Visualization of rapid penetration of water into cracked cement mortar using neutron radiography[J]. Materials letters,2017,195:1-4.

[14] LI D,WEI R,LI L,et al. Pitting corrosion of reinforcing steel bars in chloride contaminated concrete[J]. Construction and building materials,2019,199:359-368.

[15] LU C, YUAN S, CHENG P, et al. Mechanical properties of corroded steel bars in pre-cracked concrete suffering from chloride attack [J]. Construction and building materials, 2016, 123: 649-660.
[16] OTSUKI S, MIYAZATO N, DIOL A. Influences of bending crack and water-cement ratio on chloride-induced corrosion of main reinforcing bars and stirrups. discussion and closure[J]. Aci materials journal, 2000, 97(4): 454-464.
[17] XU F, XIAO Y, WANG S, et al. Numerical model for corrosion rate of steel reinforcement in cracked reinforced concrete structure[J]. Construction and building materials, 2018, 180: 55-67.
[18] YU S, JIN H. Modeling of the corrosion-induced crack in concrete contained transverse crack subject to chloride ion penetration[J]. Construction and building materials, 2020, 258: 119645.
[19] ZHOU Y, JIN H, WANG B. Drying shrinkage crack simulation and meso-scale model of concrete repair systems[J]. Construction and building materials, 2020, 247: 118566.
[20] ZHOU Y, JIN H, WANG B. Modeling and mechanical influence of meso-scale concrete considering actual aggregate shapes[J]. Construction and building materials, 2019, 228: 116785.
[21] ANGST U, ELSENER B, LARSEN C, et al. Critical chloride content in reinforced concrete – A review[J]. Cement and concrete research, 2009, 39(12): 1122-1138.
[22] ZACCHEI E, NOGUEIRA C, et al. Chloride diffusion assessment in RC structures considering the stress-strain state effects and crack width influences[J]. Construction and building materials, 2019, 201: 100-109.
[23] CAO C, CHENG M. Non-uniform rust expansion for chloride-induced pitting corrosion in RC structures[J]. Construction and building materials, 2014, 51: 75-81.
[24] ZHANG Y, YE G. A model for predicting the relative chloride diffusion coefficient in unsaturated cementitious materials[J]. Cement and concrete research, 2019, 115: 133-144.
[25] MARTIN B, ZIBARA H, HOOTON R, et al. A study of the effect of chloride binding on service life predictions[J]. Cement and concrete research, 2019, 115: 133-144.
[26] XU F, XIAO Y, WANG S. Numerical model for corrosion rate of steel reinforcement in cracked reinforced concrete structure[J]. Construction and building materials, 2018, 180: 55-67.
[27] ISHIDA T, IQBAL P, ANH H. Modeling of chloride diffusivity coupled with non-linear binding capacity in sound and cracked concrete[J]. Cement and concrete research, 2009, 39: 913-923.
[28] LENG C, HOU D. Numerical simulation of chloride-induced corrosion initiation in reinforced concrete structures with cracks[J]. Brittle matrix composites, 2012, 31(1): 91-100.
[29] PARK S, KWON S, JUNG S. Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation[J]. Construction and building materials, 2012, 29: 183-192.
[30] BURKAN I, GHANI R. Modelling steel corrosion in concrete structures[J]. Materials and structures, 2006, 39(3): 291-302.
[31] MUEHLENKAMP E B, KORETSKY M D, WESTALL J C. Effect of moisture on the spatial uniformity of cathodic protection of steel in reinforced concrete[J]. Corrosion the journal of science & engineering, 2005, 61(6): 519-533.
[32] CAO C. 3D simulation of localized steel corrosion in chloride contaminated reinforced concrete[J]. Construction and building materials, 2014, 72: 434-443.
[33] SUDA K, MISRA S, MOTOHASHI K. Corrosion products of reinforcing bars embedded in concrete[J]. Corrosion science, 1993, 35(5): 1543-1549.
[34] PETERSSON P E. Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials: Tvbm-1006[R]. [S. l.]: Lund Institute of Technology, 1981.
[35] 孙立国, 杜成斌, 戴春霞. 大体积混凝土随机骨料数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005(3): 291-295.
SUN Liguo, DU Chengbin, DAI Chunxia. Numerical simulation of random aggregate in mass concrete[J]. Journal of Hohai University (natural sciences), 2005(3): 291-295(in Chinese).
[36] 马怀发, 芈书贞, 陈厚群. 一种混凝土随机凸多边形骨料模型生成方法[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(3): 196-201.
MA Huaifa, MI Shuzhen, CHEN Houqun. A generating approach of random convex polygon aggregate model[J]. Journal of China institute of water resources and hydropower research, 2006, 4(3): 196-201(in Chinese).
[37] 唐欣薇, 张楚汉. 随机骨料投放的分层摆放法及有限元坐标的生成[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(12): 2048-2052.
TANG Xinwei, ZHANG Chuhan. Layered disposition and FE Coordinate generation for random aggregate arrangement[J]. Journal of Tsinghua University (science and technology), 2008, 48(12): 2048-2052(in Chinese).
[38] DU C B, SUN L G. Numerical simulation of aggregate shapes of three-dimensional concrete and its application[J]. Journal of aerospace engineering, 2013, 26(3): 515-527.
[39] TRAN K, NAKAMURA H, KAWAMURA K, et al. Analysis of crack propagation due to rebar corrosion using RBSM[J]. Cement and concrete composites, 2011, 33: 906-917.
[40] ZHAO Y, JIN W. Steel corrosion-induced concrete cracking[M]. Oxford: ICE Publishing, 2016.

(编辑　张璐)